

# UAV による写真測量技術の精度検証

ACCURACY ASSESSMENT OF TOPOGRAPHICAL SURVEY

BY USING STILL IMAGE TAKEN FROM UAV

田中 龍児<sup>1</sup>・外山 泉<sup>2</sup>・長山 昭夫<sup>3</sup>

Ryoji TANAKA, Izumi TOYAMA, and Akio NAGAYAMA

<sup>1</sup> 第一工業大学 (〒899-4332 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2)

E-mail: r-tanaka@daiichi-koudai.ac.jp

<sup>2</sup> 砂防エンジニアリング株式会社 (〒350-0033 埼玉県川越市富士見町 31-9)

E-mail: izumi8\_toyama@saboeng.co.jp

<sup>3</sup> 鹿児島大学学術研究院 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

E-mail: nagayama@oce.kagoshima-u.ac.jp

**Key Words:** *topographical survey, uav, drone, still image*

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) can fly at a low altitude (below several hundred meters), so high-resolution pictures are obtained. Though, when taking some pictures of the slope with the great difference of ups and downs, the precisions are not uniform. And also there is a problem with adjustment calculation of an internal orientation element because a UAV camera isn't the product developed for the purpose of measurement. In this paper, we report the problems of the difference in the flight height and the calibration of the camera lens.

## 1. はじめに

近年、無人飛行機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle, 通称ドローン, または UAS: Unmanned Aircraft System) の利活用が急速に進み, 調査・測量, インフラ点検等の多くの分野で利活用されるようになった。一昨年の熊本地震や, 昨年 7 月の九州北部豪雨では, 立ち入りのできない条件下における早期被災状況の把握のために, 動画や静止画が空撮され, インターネットでも多数公開された。UAV は有人航空機よりも低空で飛行でき, 高解像度の画像が得られるため, 今後ますますその活用が期待されている。

しかしながら, 撮影対象地が長大で高低差の大きい傾斜面では, 基準面に平行に撮影する方法では, 精度が不均一となることが指摘されている<sup>1)</sup>。また, UAV 搭載のカメラは測量を目的として開発された製品ではないため, 内部標定要素の調整計算にも問題があることも指摘されている<sup>2)</sup>。本稿では, 撮影高度の違いによる精度と UAV を基準面に平行に飛行させ空撮する方法と地表面に平行に飛行させ空撮する場合についての測量的誤差, およびカメラレンズのキャリブレーションの検証結果について報告する。

## 2. UAV による写真測量の流れ

従来の写真測量は地図 (数値地形図) を作成することが目的で, オーバーラップ 60%, サイドラップ 30%程度重複して撮影された写真を用い, 各写真の共通な点を抽出し地上座標を与え, カメラの位置と傾きを求めてから手作業で描画する方法である。UAV による写真測量においても地図情報レベル 250 から 500 の数値地形図データの作成は可能であり, UAV を用いた公共測量マニュアル (案)<sup>3)</sup> (以下, 公共測量マニュアル) にも規定されている。

これに対して, SfM (Structure from Motion) と呼ばれる三次元点群を作成する新しい写真測量の方法は, 土木工事現場での土量管理に必要な応用測量にも適用可能で, UAV による写真測量は点群を作成する目的で実施される場合がほとんどである。SfM は, コンピュータビジョンやロボットビジョンから発達した技術で, 二次元である画像からカメラ位置や三次元形状を復元する技術である。基本的な原理はバンドル法を用いることなど, 従来の写真測量と共通する部分も多いが, いずれの場合でも, 写真測量で

用いる場合、初期条件として地上座標を測量して入力する必要がある。図-1は、一般的な三次元点群を作成するための UAV 空撮測量作業の流れであるが、撮影と標定点の座標を求める測量以外はほぼ自動化されていることが特徴であり、このことも三次元点群を作成する方法が普及している理由のひとつでもある。SfM の処理の後、MVS (Multi-view Stereo) と呼ばれるカメラ位置などのパラメータから高密度の点群を生成する処理が行われるが、ソフト上は一連で行われるので、本稿では単に SfM とした。また、市販の SfM ソフトでは簡易な GIS の機能を有するものがある。

### 3. 使用した UAV と撮影方法

使用した UAV の諸元を表-1 に示す。また、搭載カメラの諸元を表-2 に示す。撮影は DJI 製の基本ソフトウェア DJI GO でコンパスキャリブレーション等の初期設定を行った後、フリーソフトの自律飛行ソフトウェア Altizure に切り替え、図-2 のように、隣接写真とのオーバーラップ 80%、コース間のサイドラップ 60%以上で、撮影高度を 10m から 50m ま

で 10m ずつ変化させ、平坦な同一範囲の静止面を撮影した。カメラはソフトの設定限度である鉛直方向から 15° 傾けて斜め写真を撮影した。図-3 は、標定点と検証点である。

公共測量マニュアルでは、三次元点群作成の場合の外側標定点は、計測対象範囲を囲むように、隣り合う外側標定点の距離は 100m 以内とし、内側標定点は、内側標定点とそれを囲む標定点との距離は 200m 以内で最低 1 点は設置する。また検証点については、標定点の総数の半数以上（端数は繰り上げ）で、計測対象範囲内に均等に配置するように規定されている。本稿の図では撮影範囲 (30m × 50m) の 4 隅の点を外側標定点とし、他の 8 点を検証点としているが、すべての点をトータルステーションで計測しているので、例えば内側標定点として解析するなど、様々なパターンのデータが取得可能になっている。図-4 は、使用した発泡スチロール製の対空標識(0.3m × 0.3m)である。計測した点が視認できるように、中央に直径約 0.1m の穴を開けている。撮影高度 20m までは明瞭に視認できた。それ以上の撮影高度では、円中心を計測点とした。

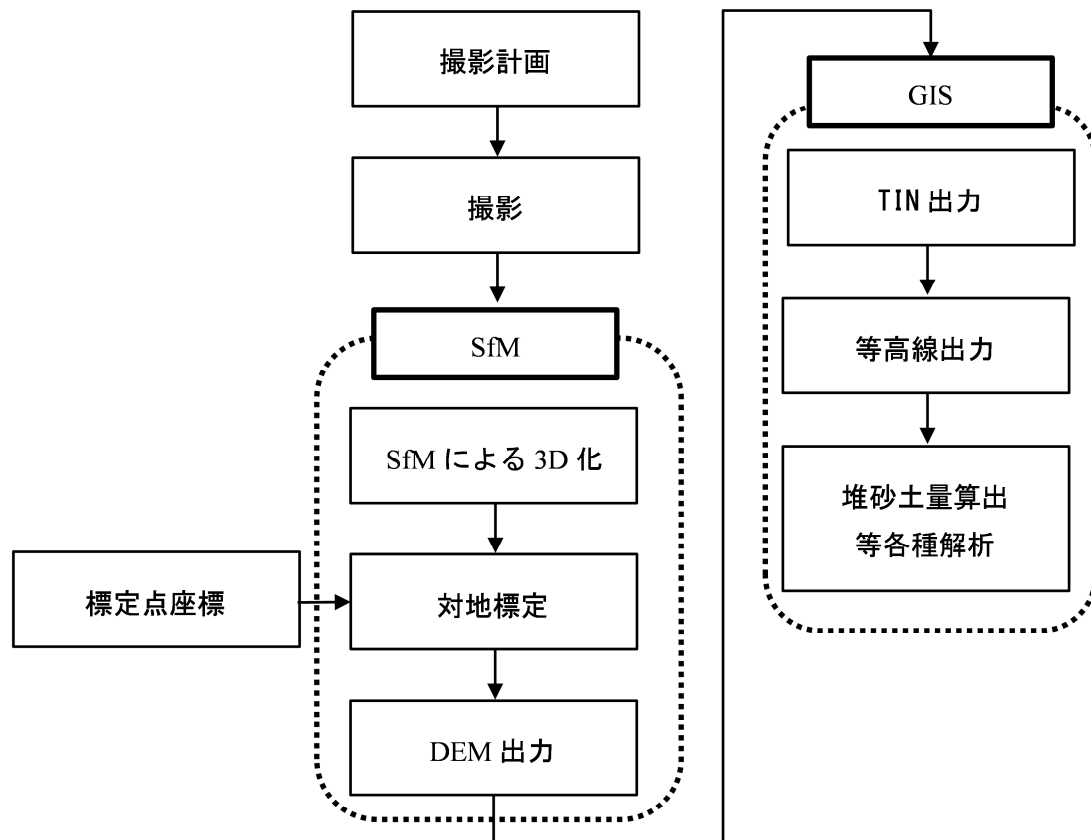


図-1 一般的な UAV 空撮測量作業の流れ

### 4. 検証結果

解析には、Agisoft 製の三次元再構成ソフト Photo Scan Professional Edition (以下「Photo Scan」という.) を用いた。SfM の精度は、アラインメント、高密度化処理ともに中程度とした。また、GIS の処理は検証結果には影響しないが、ESRI 製の ArcGIS を用いた。検証点の水平位置と標高は、Photo Scan の中で「推定値」と表示された数値を、トータルステーションによる実測値と比較した。

#### 4.1 撮影高度の違いによる精度

撮影高度の違いによる水平位置と標高の誤差を総合した平均二乗誤差の最大値と最小値を表-3 に示す。また、検証点における水平位置の測定値と実測値の差を図-5 に示す。写真測量の原理で、 $H = m \cdot f$  (ただし、 $H$ : 撮影高度、 $m$ : 縮尺分母、 $f$ : 画面距離) という関係があり、撮影高度が高くなると写真縮尺が小さくなり精度も悪くなるが、水平位置の精度は、検証点位置によってばらつき、撮影高度との撮影高度が高くなると精度が悪くなるといった関係は見られなかった。

これに対して標高の精度は図-6 に示すように、撮影高度 40m を除き、50m の精度が最も高く、10m から 30m ではこの順に精度が悪くなるといった逆転の現象が見られた。また、検証点番号 7 から 10 の誤差が大きいが、撮影範囲の中央付近であり、標定点から離れているためであると考えられる。このことから、外側標定点は、計測対象範囲を囲むように配置し、内側標定点は、1 点以上とする必要性が示された。

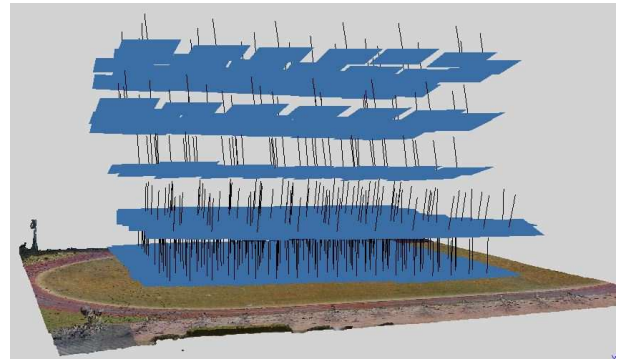


図-2 撮影位置

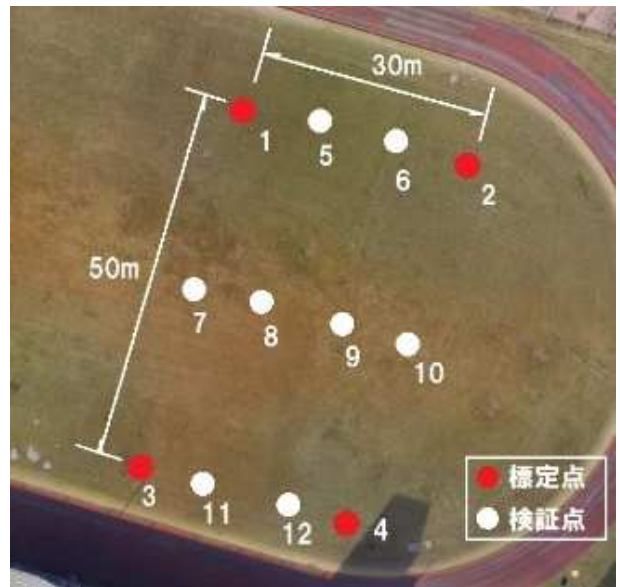


図-3 標定点と検証点

表-1 UAV の諸元

項目	概要
機体	DJI, PHANTOM3 STANDARD, 1.3kg
操縦装置	DJI, PHANTOM3 STANDARD専用GC390wA
最高速度	16m/s
飛行最大距離	500m



図-4 対空標識

表-2 カメラ諸元

項目	概要
画角	94°
焦点距離	20mm/35mm
動画画素数	2.7K(2,704 × 1,520ドット)/30fps
センサーサイズ	1/2.3型(6.2 × 4.7mm)

表-3 撮影高度の違いによる平均二乗誤差

撮影高度 (m)	平均二乗誤差 (m)	
	最大値	最小値
10	0.11	0.07
20	0.09	0.02
30	0.09	0.03
40	0.13	0.07
50	0.10	0.08

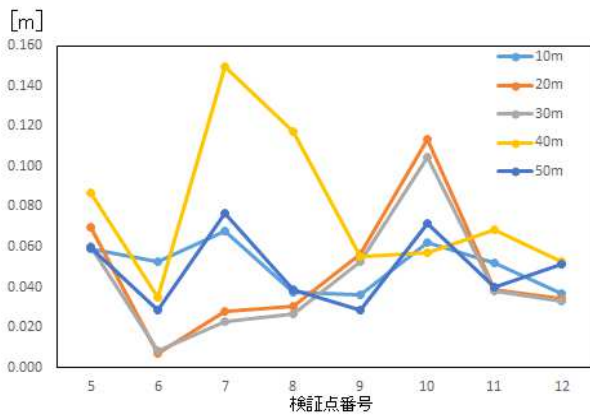


図-5 水平位置の測定値と実測値の差

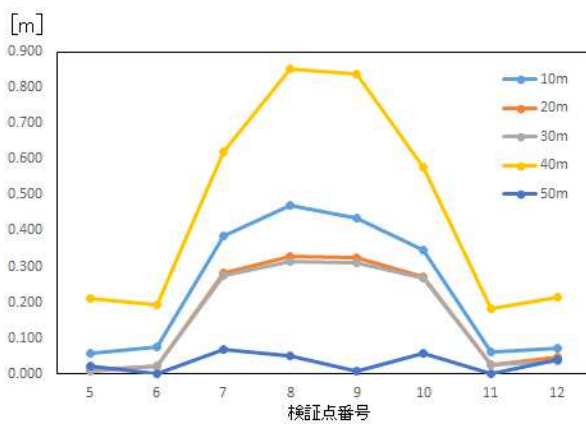


図-6 標高の測定値と実測値の差

#### 4.2 起伏のある地表面での精度

起伏のある地形では、従来の有人飛行機による写真測量のように撮影基準面と一定の高度を保って撮影すると、部分的に撮影高度の差が大きくなり、精度が不均一になることが考えられる。ここでは、UAVを地表面に平行に飛行する方法と、基準面と30mの高度を保って飛行する方法についての精度の検証を行った。

図-7は基準面に平行に撮影した場合のイメージであり、図-8は基準面に平行に飛行した場合のカメラ位置である。起伏のある地形を平坦地で再現するには、逆に撮影高度を変化させれば良い。しかし、階段状にUAVを飛行させることはマニュアル操縦では難しく、既成の自律飛行ソフトでもこのような複雑な飛行の設定が困難なため、10mから50mの10m間隔で等高度撮影した静止画を用いて、10mは3コース、20mから50mは各1コース分、計73枚の静止画像を使用した。

次に、図-9は起伏のある地表面に平行に飛行した場合を想定した撮影方法のイメージである。起伏のある地形を平坦地で再現するために、撮影高度を地

表面に平行に30mの一定高度を保って飛行したデータ場合について、検証点5から12の位置誤差を計測した。図-11は図-10の解析データをもとに検証点5から12の位置誤差を地表面に平行に飛行した場合と、基準面と平行に飛行した場合を比較したものである。撮影高度が高くなると、基準面と平行に飛行した場合は、地表面に平行に飛行した場合よりも精度が悪くなることを確認できた。

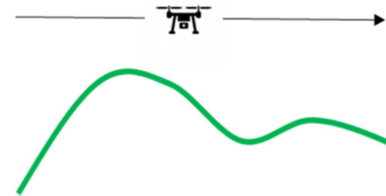


図-7 基準面に平行に撮影する場合のイメージ

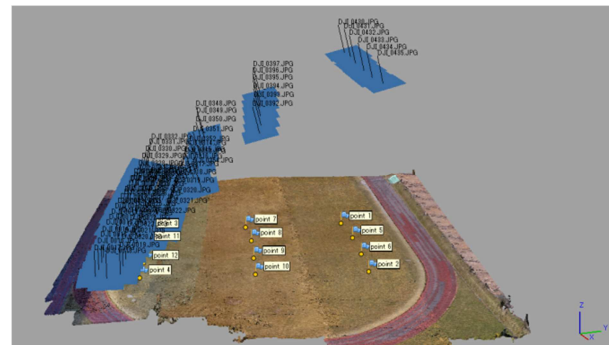


図-8 基準面に平行飛行のカメラの位置

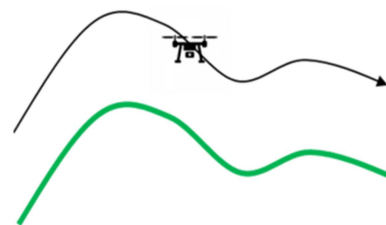


図-9 地表面に平行に飛行させる場合のイメージ

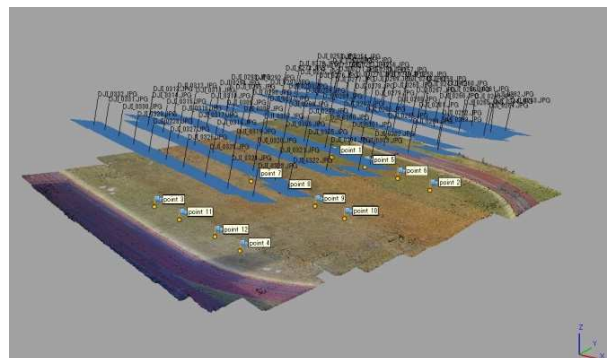


図-10 地表面に平行飛行のカメラの位置

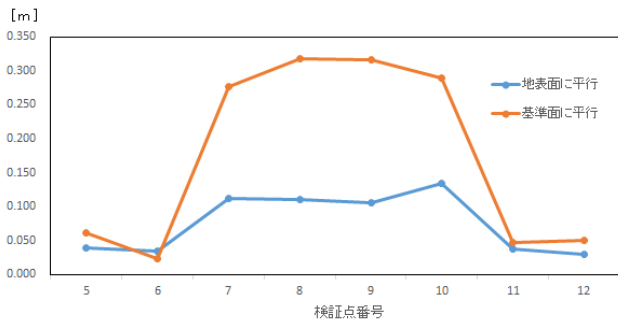


図-11 飛行方法の違いによる精度

### 4.3 すべての写真を用いた場合の精度

本研究で撮影されたすべての435枚の写真を用い、検証点の位置誤差を計測した。図-12は検証点5から12の位置誤差である。写真枚数が多くなると、標定点からの距離に関係なく、精度が良くなっており、最大誤差は0.124m、平均誤差0.078mであった。また、図-13は、撮影高度ごとのSfM画像であり、撮影高度が高くなるにつれ点密度が疎になっていることが分かる。

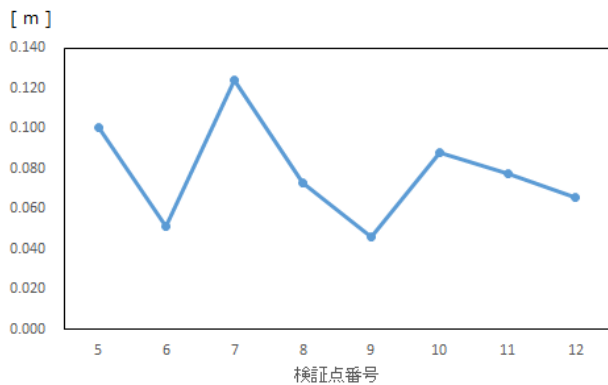


図-12 すべての写真によるSfMの誤差

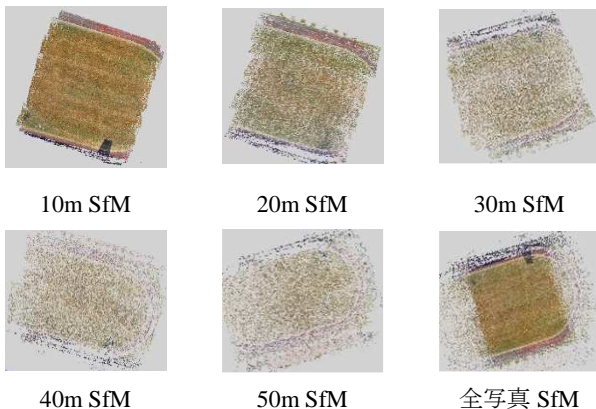


図-13 撮影標高ごとのSfM

### 4.4 キャリブレーションの検証

撮影高度40mで撮影された30枚の静止画を用い、標定点設定なし、ありの場合のセルフキャリブレーションと独立したキャリブレーションの4パターン

について、Photo Scanで高密度の三次元点群を作成し、形状を比較した。図-14から図-17にその結果を示す。

図-14より、セルフキャリブレーションの場合は、標定点の有無に関係なく全体が湾曲している。標定点がある場合(図-15)、標定点に囲まれた部分は平坦に見えるが、他は逆に湾曲が大きくなっている。これに対して、独立したキャリブレーションを設定すると(図-16, 図-17)、標定点が無くても平坦になっており、キャリブレーションの効果が出ている。このことから、UAVに搭載されたカメラを用いる場合は、セルフキャリブレーションではなく、予め計測されたキャリブレーション係数を設定してから、SfMを作成すべきであるということが示された。



図-14 セルフキャリブレーション (標定点なし)



図-15 セルフキャリブレーション (標定点あり)



図-16 独立したキャリブレーション (標定点なし)



図-17 独立したキャリブレーション  
(標定点あり)

## 5. まとめ

SfMはコンピュータビジョンやロボットビジョンからきた概念であり、バンドル法を用いることなど基本的な部分は従来の写真測量の解析法と同じである。しかし、それと大きく異なるのは、カメラの位置・姿勢推定（外部標定）が自動で行われることである。また、内部標定も自動で行う（セルフキャリブレーション）ことが多い。そのため、同じ静止画を用いても、使用するソフトにより、あるいは、わずかな条件の違いでも精度が大きく異なる場合があり、その挙動は複雑である。公共測量マニュアルでは、カメラキャリブレーションに関して、「セルフキャリブレーションを標準とし、独立したカメラキャ

リブレーションは必ずしも求めない。」となっており、本検証と相反する結果となっている。キャリブレーションに関しては、今後さらに検討を進める必要があると考える。

また、標高の精度に関しては、50m程度の撮影高度では、SfMの精度にほとんど影響が出なかった。

一方、カメラの精度を上げることで誤差が少なくなり正確な測量ができるようになると考えられるが、長大な斜面ではUAVを基準面と平行に飛行すると精度が不均一になるということが示された。しかし、重複度を一定に保ちながら、マニュアル操縦で斜面に沿って飛行させることは困難である。そのため、UAVをなるべく地表面と一定の高度を保ちながら飛行する自律飛行アプリの開発が望まれる。

謝辞：本研究は、(公財)鹿児島県建設技術センターの助成により実施された。ここに記して、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 松田裕也：長大法面における空中写真測量による出来形管理，平成 29 年度近畿地方整備局研究発表会論文集，12.
- 2) 菅井秀翔，宮地邦英，中村孝之，南秀和，橘克巳：UAV を活用した写真測量の精度検証，国土地理院時報，129，2017.
- 3) 国土交通省国土地理院：UAV を用いた公共測量マニュアル（案），平成 29 年 3 月改正.